

Jan SIDOR

e-mail: jsidor@agh.edu.pl

Katedra Maszyn Górniczych, Przerobczych i Transportowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Metoda wizualizacji wyznaczania parametrów ruchu mielników w młynie wibracyjnym

Wstęp

W młynach z mielnikami swobodnymi: grawitacyjnym, wibracyjnym, planetarnym, czy obrotowo-wibracyjnym na proces mielenia mają wpływ parametry kinematyczne ruchu mielników w komorze czyli ich: przemieszczenia, prędkości, energie, liczba wzajemnych zderzeń oraz liczba zderzeń pomiędzy mielnikami a wykładziną komory. Wyznaczenie ilościowe tych parametrów ruchu mielników powinno poprzedzać określenie najkorzystniejszych parametrów procesu mielenia, uzyskanych z obiektu rzeczywistego czyli laboratoryjnego lub przemysłowego młyna.

Dla niektórych młynów można intuicyjnie przewidzieć jak parametry ruchu komory mogą wpływać na ruch mielników, a w konsekwencji na proces mielenia. Na przykład w młynie wibracyjnym im większe wartości przyjmują częstotliwość i amplituda drgań, tym proces mielenia będzie intensywniejszy. Jednak trudno jest określić w ten sposób najkorzystniejszy stopień napełnienia komory, który ma znaczny wpływ na proces mielenia. Celem konstruktora przy projektowaniu tego rodzaju młyna jest przyjęcie tylko takich wartości maksymalnych ruchu drgającego, przy których proces mielenia będzie miał największą efektywność, a młyn największą trwałość – przy możliwie najniższych kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Oddziaływanie ładunku (mielników z mielonym materiałem) na ustrój młyna wibracyjnego *Bauman* [1975] uwzględnił za pomocą współczynnika reakcji inercyjnej.

Współczynnik ten dla młynów wibracyjnych wynosi $0,25 \div 30$, a dla młynów obrotowo-wibracyjnych $0,25 \div 0,35$ [Sidor 1986; 2005].

Próbę zastosowania wizualizacji do jakościowego określenia ruchu ładunku jako masy skupionej w młynie wibracyjnym podjął *Kaczmarczyk* [1977].

Kolejną próbę wyznaczania parametrów ruchu mielników traktowanych jako zbiór punktów materialnych, o wzajemnym oddziaływaniu, zdeterminowanym zajmowanym miejscem w komorze młyna podjął *Kurrer* [1986]. Bardzo ogólny opis przekazywania energii przez mielniki zawarto również w pracy [Kurrer; 1988]. Niestety, w żadnej z tych prac nie przeprowadzono weryfikacji eksperymentalnej tego opisu.

Natomiast przedstawioną w pracy metodę wizualizacji zweryfikowano pozytywnie w młynie obrotowo-wibracyjnym dwoma sposobami: symulacją komputerową oraz przez aprawdzenie na obiekcie rzeczywistym [Sidor; 2004; 2005].

Cel i metoda badań

Celem badań było eksperymentalne wyznaczenie podstawowych parametrów ruchu mielników w komorze młyna wibracyjnego, a mianowicie przemieszczeń, prędkości oraz energii kinetycznej.

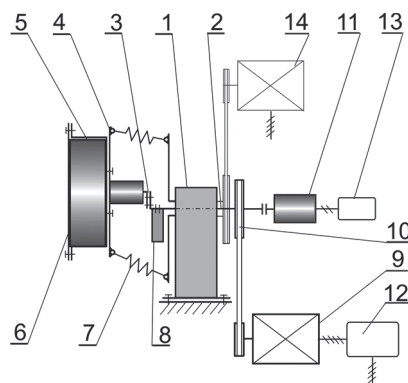
W badaniach przyjęto metodę opracowaną do wyznaczania parametrów ruchu mielników w młynie obrotowo-wibracyjnym [Sidor; 2004; 2005]. Parametry kinematyczne i technologiczne młyna wibracyjnego wyznaczono na podstawie prac [Rose 1962; Sidor 2005] oraz wstępnych prób rejestracji filmowej ruchu mielników. Dla tej metody badań opracowano oryginalny system zapisu filmowego, umożliwiający rejestrację sekwencji kolejnych 8 obrazów z szybkością do 100 000 obrazów/s.

Na podstawie wyników wstępnych prób, w badaniach zastosowano komorę o wewnętrznej średnicy 123 mm. Jako elementy robocze wykorzystano jednakowe kulki korundowe o średnicy 13,5 mm. Zastosowano je ze względu na ich biały kolor oraz możliwość ich znakowania.

mory z wykładziną stalową gładką o średnicach: 125 mm, 210 mm oraz 310 mm, przy czym każda z nich posiada dwie pokrywy – metalową do prowadzenia procesu mielenia oraz przezroczystą umożliwiającą obserwację i rejestrację filmową ruchu ładunku w komorze. W wyposażeniu stanowiska znajdują się jeszcze inne komory z wykładziną ceramiczną lub z tworzywa polimerowych. Widok stanowiska młyna wibracyjnego z systemem do rejestracji ruchu kul zamieszczono na rys. 2.

Do badań ruchu ładunku stanowisko młyna wyposażono w system rejestracji filmowej obrazu zawierający:

- kamerę cyfrową firmy *ARCO* o rozdzielczości 658×496 pikseli, z układem strobojącym, która umożliwiała rejestrację sekwencji kolejnych 8 obrazów z szybkością do 100 000 obrazów/s.
- oświetlacz obrazu w postaci super jasnej diody światła białego LED typ P2JW.
- komputer rejestrujący obraz, notebook *Acer*.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego laboratoryjnego młyna wibracyjnego: 1 – moduł napędu, 2 – wał wibratora, 3 – wał mimośrodowy, 4 – tarcza, 5 – komora, 6 – pokrywa komory, 7 – sprzęgło, 8 – obciążnik, 9 – silnik wibratora, 10 – czujnik, 11 – czujnik, 12 – układ pomiarowy, 13 – układ zasilania, 14 – silnik napędu komory

W komorze umieszczano początkowo trzy warstwy tych mielników, co niestety utrudniało ich identyfikację. Dlatego zmniejszono głębokość komory do 15 mm przez wprowadzenie do niej wkładki w kolorze czarnym. Pozwoliło to na umieszczenie tylko jednej warstwy mielników. Mielniki oznaczano różnymi znakami w kolorze czarnym. Do opracowania wyników badań zastosowano program *IMAQ Vision Builder*, a wyniki opracowano za pomocą programu *MS Excel*.

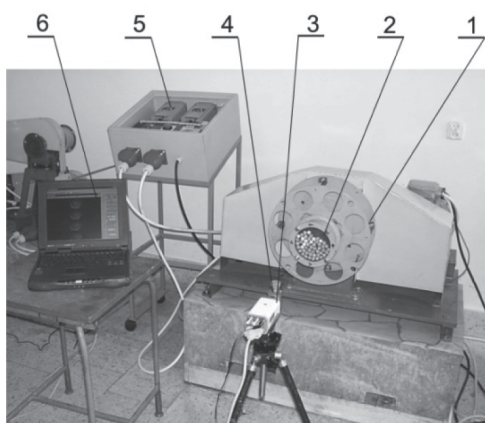
Opis badań

Stanowisko badawcze młyna

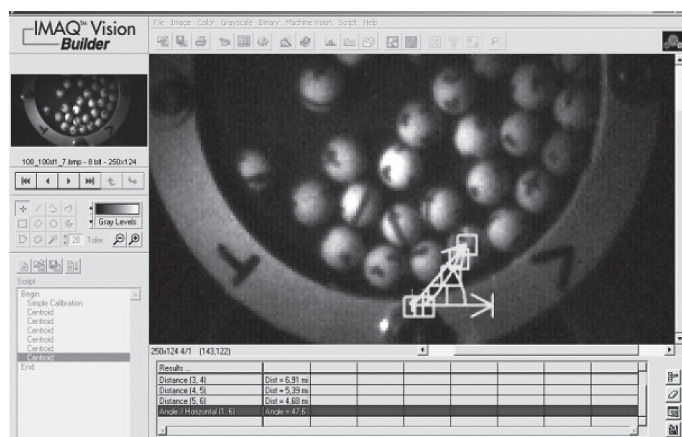
Schemat budowy stanowiska badawczego laboratoryjnego młyna wibracyjnego o działaniu okresowym, kołowej trajektorii amplitudy ruchu drgającego z kinematycznym wymuszeniem ruchu drgającego zamieszczono na rys. 1.

Młyn wyposażony jest w dwa napędy. Napęd wibratora do realizacji ruchu drgającego oraz dodatkowy napęd komory – nieużywany w badaniach.

Stanowisko badawcze zapewnia możliwość przeprowadzania badań procesu mielenia wibracyjnego w następujących zakresach częstotliwości drgań komory: $0 \div 25$ Hz, prędkości kątowej komory: $0 \div 30$ rad/s oraz amplitudy drgań komory: $2,5 \div 14$ mm. Moc silnika wibratora wynosi 3,5 kW, a silnika komory 0,75 kW. Stanowisko wyposażone jest w ko-



Rys. 2. Widok stanowiska z systemem rejestracji obrazu:
1 - moduł napędu, 2 - komora z mielnikami, 3 - kamera, 4 - dioda LED,
5 - falownik wibratora, 6 - rejestrator obrazów - notebook



Rys. 4. Przykład wyznaczania wartości dróg z sekwencji położenia środka ciężkości kulki z rys. 3

System rejestracji obrazu

Kamera posiadała światłoczuły sensor firmy *Texas Instruments*. Sensor miał dwie powierzchnie z warstwą światłoczułą i zawierał matrycę składającą się z dwóch części: światłoczułej – odsłoniętej i drugiej – zasłoniętej zwanej pamięcią. Obie części matrycy miały taką samą liczbę pikseli. Podczas pracy kamery w trybie *Frame-Transfer* obraz z jednej matrycy przenoszony był do drugiej matrycy. Zarejestrowany obraz był w zadanym czasie kopiowany i przenoszony do dolnej połowy matrycy, a górna połowa (jako czysta) była gotowa do rejestracji następnego obrazu. Kolejny błysk światła na obiekcie powodował ponowne naświetlenie górnej połowy matrycy i skopiowanie jej do matrycy pamięci. W ten sposób powstawała sekwencja kolejnych klatek filmu.

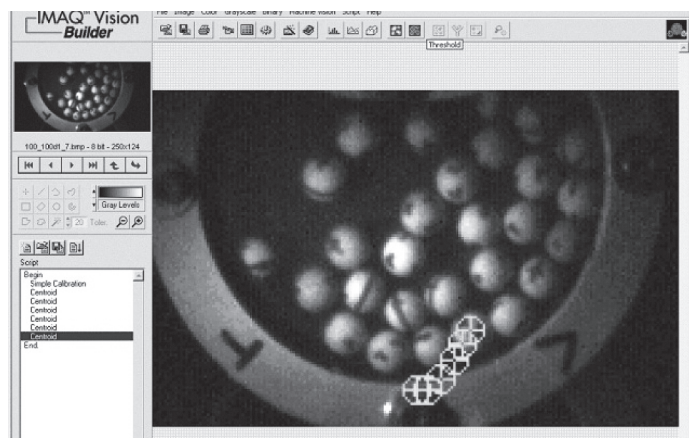
Kamera miała wbudowany układ zasilania oświetlacza z możliwością strobowania wewnętrznego (programowego) lub zewnętrznego (w wejście wyzwalające). Umożliwiał on wysterowanie diod LED (lub lasera diodowego).

Obsługę kamery zapewniał napisany w tym celu program umożliwiający ustawianie jej parametrów (liczby rejestrowanych klatek, liczbę klatek/s, wzmocnienie, czas błysku diody oświetlającej i opóźnienie błysku, tryb wyzwalania) oraz sterowanie jej pracą. Program umożliwiał także zaawansowaną analizę uzyskanych obrazów oraz ich zapis w formie plików (map bitowych).

Program i wyniki badań

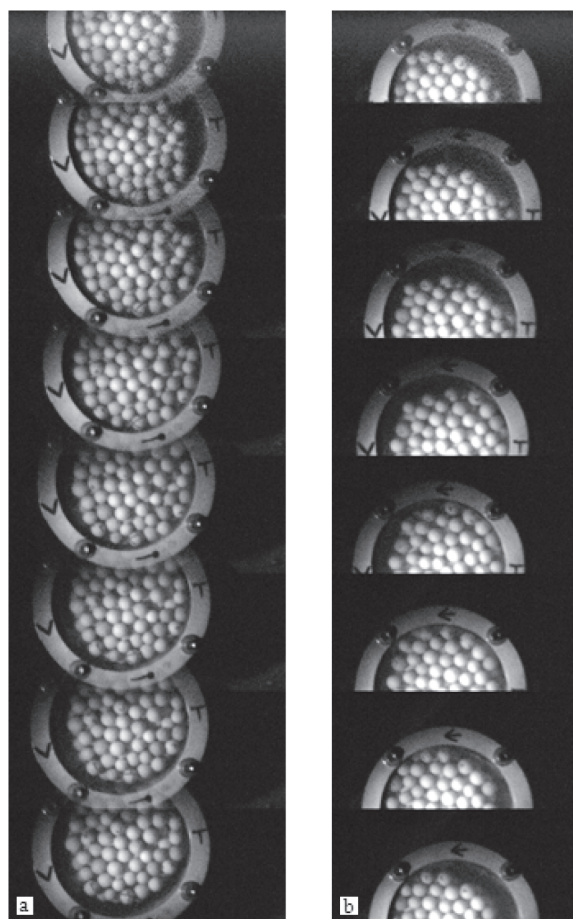
Program badań obejmował wyznaczenie parametrów ruchu mielników – jednej warstwy dla ustalonych parametrów ruchu drgającego komory: częstotliwości drgań 10 Hz, amplitudy drgań 7,5 mm, stopnia napełnienia 0,70. Wówczas w komorze było 49 kulek.

Sposób wyznaczenia trajektorii ruchu każdej z kulek przedstawiono na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Sekwencja kolejnych położenia środka ciężkości kulki co 10 ms (w dolnej strefie komory)

Na rys. 5 przedstawiono obrazy chwilowych położenia kulek w czasie kolejnych 100 ms.



Rys. 5. Przykład wyznaczania wartości dróg z sekwencji położenia środka ciężkości:
a) dolna strefa komory, b) górna strefa komory

Kamera rejestrowała ruch mielników w dwóch ujęciach części komory dolnej i górnej. Komorę podzielono na trzy strefy aktywności kulek: wysokiej aktywności – zawierającą kulki w pobliżu wykładziny komory, średniej aktywności – zawierającą drugą i trzecią warstwę współśrodkową kulek oraz małej aktywności – zawierającą kulki w środkowej strefie komory.

Opracowanie wyników badań

W opracowaniu wyników badań przyjęto następujące założenia:
– w analizowanych przedziałach czasu – 10 ms kulki wykonują ruch postępowy jednostajny,

- pominięto udział ruchu obrotowego kulek, ponieważ jak zaobserwowano w eksperymencie, udział tego ruchu był niewielki,
- rejestrację ruchu przeprowadzano bez materiału mielonego,
- prędkości kulek zdefiniowano jako stosunek przebytej drogi od jednego położenia do następnego w czasie 10 ms,
- energię kinetyczną kulki korundowych obliczano z jej prędkości,
- drogi, chwilowe prędkości i wartości energii kinetycznej wyznaczano w dwóch fazach ruchu drgającego komory: w górę – od najniższego dolnego położenia komory oraz w dół – od najwyższego górnego położenia komory.

Opracowanie wyników badań było bardzo pracochłonne, ponieważ należało analizować osiem zmian drogi, prędkości, energii i przyspieszenia każdej z 49 kulek. Wyniki tej analizy zamieszczono na rys. 6–8.

Obliczone zmiany energii dotyczą mielników korundowych o gęstości $4,0 \text{ kg/dm}^3$. Wyniki obliczeń zamieszczono w tab. 1.

Tab. 1. Prędkości i energie kinetyczne kul obliczone metodą analityczną (mielniki korundowe o gęstości $4,0 \text{ kg/dm}^3$)

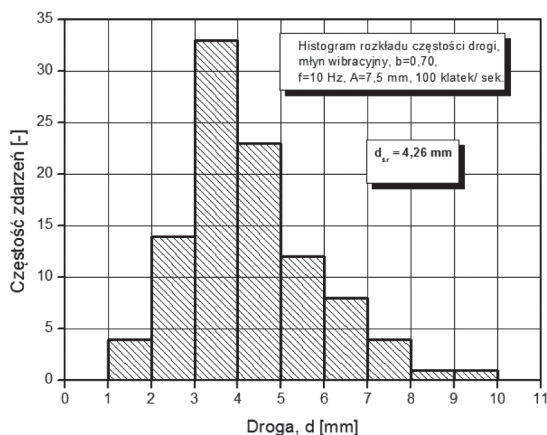
Strefa komory	Parametr ruchu kulek			
	Droga, d , [mm]	Prędkość, v , [m/s]	Energia, E , $\cdot 10^{-4}$ [J]	Przyspieszenie, a , [m/s^2]
Dół	4,46	0,446	5,1	0,016
Góra	4,07	0,407	4,2	0,017
Średnia	4,26	0,426	4,6	0,016

Podsumowanie i wnioski

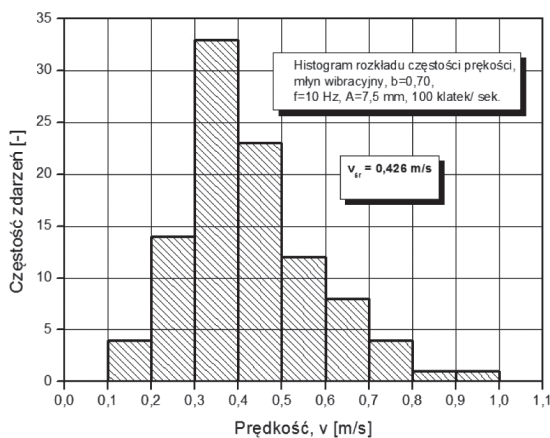
Przedstawiona metoda wizualizacji jest metodą eksperymentalną i umożliwia wyznaczanie podstawowych parametrów ruchu mielników w komorze młyna wibracyjnego. Stosunek całkowitej energii kulek do czasu stanowi moc pobieraną na ich ruch. Jej znajomość ułatwia wyznaczanie mocy młynów przemysłowych [Sidor, 2005].

Młyn umożliwia zastosowanie tej metody w komorach o średnicach 210 mm i 310 mm, czyli takich jakie mają młyny przemysłowe, ale możliwości techniczne systemu wizualizacji nie pozwalały zastosowania go do tych komór. Parametry ruchu mielników wyznaczono przy bardzo niskim przyspieszeniu ruchu drgającego $29,6 \text{ m/s}^2$, które w przemysłowych młynach wibracyjnych wynosi powyżej 60 m/s^2 .

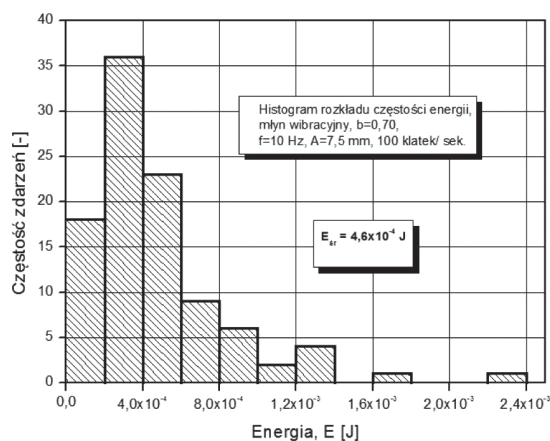
Dobre możliwości technologiczne młynów wibracyjnych autor zwerifikował pozytywnie w kilku młynach przemysłowych i laboratoryjnych [Sidor 2004; 2005; 2009; Sidor i Tomach, 2010].



Rys. 6. Histogram rozkładu zmian drogi kulek w komorze



Rys. 7. Histogram rozkładu zmian prędkości kulek w dolnej części komory



Rys. 8. Histogram rozkładu zmian energii kulek w dolnej części komory

LITERATURA

- Bauman W.A., Klušancev B.W., Martynov W.D., 1975. *Mechaničeskoje obo-rodowanieje predpriatij stroitielnych materialov, izdelij i konstrukcji*. Mašinstrojenije, Moskwa
- Kaczmarczyk S., 1977. *Analiza eksperymentalna wpływu wybranych parametrów technologicznych i konstrukcyjnych na pracę młyna wibracyjnego*. Rozprawa doktorska. AGH, Kraków
- Kurrer K.E., 1986. *Zur innen Kinematik und Kinetik von Rohrschwingmühlen*, Technische Universität, Berlin. D83
- Kurrer K., E., Gock E., Michaelis S., 1988. *The rotary chamber vibrational mill, a further development of the customary tube vibrational mill* [w:] Proc. of the XVI International Mineral Processing Congress, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, 221-230
- Rose H.: 1962. *Some observations on vibration mills and vibration milling*, Symposium Zerkleinern. Verlag Chemie GMBH, Weinheim 427-456
- Sidor J., 1986. *Ocena współczynnika oddziaływania inercyjnego ładunku w młynie obrotowo-wibracyjnym metodą wizualizacji*. Zesz. Nauk. Pol. Rzeszowskiej, nr 31, 215-218
- Sidor J., 2004. *Wyznaczanie parametrów ruchu mielników w młynie obrotowo-wibracyjnym za pomocą wizualizacji* [w:] Problemy w Budowie i Eksploatacji Maszyn i Urządzeń Technologicznych, Wyd. WIMIR AGH, Kraków nr 23, 173-181
- Sidor J., 2005. *Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych*, UWND AGH, Kraków
- Sidor J.: 2009. *Opracowanie konstrukcji młyna wibracyjnego do bardzo drobnego mielenia na mroko tlenku chromu*. Inż. Ap. Chem., 48, nr 4, 114-115
- Sidor J., Drzymała Z., 2002. *Synteza konstrukcji przemysłowego młyna wibracyjnego o niskiej częstotliwości drgań do mielenia tlenku chromu na sucho*, Zesz. Nauk. Pol. Białostockiej, nr 9, 405-414
- Sidor J., Tomach T., 2010. *Rozwój konstrukcji rurowych młynów wibracyjnych*. *Maszyny Górnicze*, 28, nr 1, 27-34

Autor składa podziękowanie Panu Jerzemu Niedźwiedzkemu za opracowanie systemu wizualizacji i rejestracji materiału fotograficznego oraz szczególne podziękowanie Panu dr. inż. Krzysztofowi P. Krawczykowi za dużą pomoc przy opracowaniu wyników badań.